مدل‌سازی فرایند پاشش حرارتی برای تشکیل پوشش سطحی با استفاده از روش‌های آماری*

ابراهیم کمالی[۱]   علیرضا تیمورتاش[۲]   محمد پسندیده فرد[۳]

چکیده

در این مقاله، برای مدل‌سازی سه بعدی پوشش سطحی ناشی از فرایند پاشش حرارتی و به‌دست آوردن مشخصّات آن از روش آماری استفاده شده است. در این روش، برخورد تک تک قطره‌های سرامیک مذاب و تأثیرگذاری آن‌ها در شکل‌گیری لایه‌های پوشش بررسی شده است. برای این منظور، مدل‌های تحلیلی برای دینامیک پخش شدن قطره‌ها و برگشت لبه‌ی قطره‌های پخش شده به سمت بالابه‌کار گرفته شد، و فرض شد که برگشت لبه‌های اسپلت تنها عامل ایجاد تخلخل باشد. مدل‌سازی برای بخش کوچکی از صفحه انجام شد که به‌روش پلاسما با سرامیک زیرکونیای پایدارشده با یوتریوم (YSZ) پوشش داده شده بود. در نهایت، مقدار متوسط تخلخل پوشش و ضخامت پوشش محاسبه شدند، و نتایج به‌دست آمده با نتایج تجربی مطابقت داشت. افزون بر این، تأثیر عوامل مختلف فرایند شامل فاصله‌ی مشعل از سطح، سرعت حرکت مشعل و میزان حجم مواد مصرفی در واحد زمان بر خواص پوشش مانند تخلخل و ضخامت نیز بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی مدل آماری، فرایند پاشش حرارتی، تخلخل پوشش، ضخامت پوشش، برگشت لبه.

Modeling the Thermal Spray Process for the Formation of Surface Coatings using the Stochastic Methods

A. Kamali   A.R. Teymourtas   M. Passandideh Fard

Abstract

In this paper, a 3D stochastic model has been presented to predict the coating thickness and porosity in a thermal spray coating process. Different values of processing parameters were obtained. The model was developed on the basis of prescribed rules in calculating the splat size during the impact of individual droplets on the surface of the substrate. Due to the thermal stresses produced during droplet solidification, splats were curled up in the edge regions. This mechanism was assumed to be the sole reason for the formation of porosity. The simulation was performed for a small section of the substrate. The calculated thickness and porosity were found to be in good agreement with the experimental results in this investigation, and with those already reported in the literature. The effects of different processing parameters including the gun distance from the substrate, the gun speed as well as the amount of powder feed rate on the coating properties were also investigated.

Key Words Stochastic model, Thermal spray process, Coating porosity, Coating thickness, Curl up.

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۳/۲۵ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۰/۸/۸ به دفتر نشریه رسیده است.

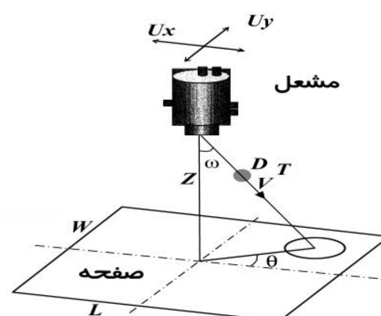
(۱) نویسنده‌ی مسوول: دانشجوی دکترای مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

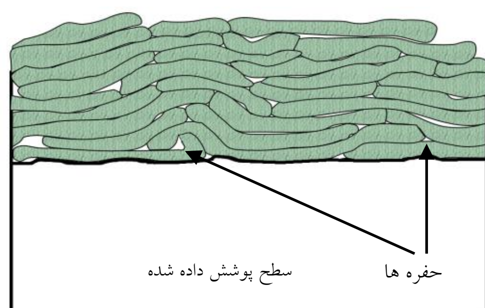
فرایند لایه‌نشانی حرارتی یکی از روش‌های ایجاد پوشش سطحی با استفاده از پودر فلزات، آلیاژها و سرامیک‌ها می‌باشد. در این فرایند، مواد اولیّه نخست به شکل پودر و به‌وسیله‌ی روش‌های حرارتی یا انفجاری به ذرات مذاب یا نیمه مذاب تبدیل می‌شود (شکل ۱). سپس این ذرات پس از پاشش بر روی سطح مورد نظر به آن چسبیده و به‌این ترتیب، پوشش سطحی به‌صورت لایه‌هایی بر روی هم تشکیل می‌شود (شکل ۲). از این روش پوشش‌دهی برای تقویت و افزایش مقاومت سطح در برابر خوردگی و سایش، و ایجاد عایق حرارتی استفاده می‌شود [1].



شکل۱ نمایی از روش پاشش حرارتی برای تشکیل پوشش سطحی

خواص مهم یک پوشش عبارتند از ضخامت، زبری و میزان تخلخل. این ویژگی‌ها وابستگی زیادی به شرایط فرایند پوشش‌دهی دارند. ذره هنگام برخورد با سطح می‌تواند مذاب، نیمه مذاب و یا جامد باشد، بنابراین کیفیّت پوشش حاصل به دینامیک برخورد این ذره با سطح و میزان پخش شدن آن بستگی دارد.

نتایج تجربی نشان می‌دهند که پوشش تشکیل شده کاملاً یک‌پارچه نبوده و بین قطره‌های پخش شده تخلخل وجود دارد (شکل۲). تخلخل‌هایی که هنگام انجماد قطره‌ها بر روی سطح و یا لایه‌های زیرین ایجاد می‌شوند، به‌میزان قابل توجهی خواص مکانیکی و حرارتی پوشش را تغییر می‌دهند. عوامل مختلفی در تشکیل تخلخل دخالت دارند که عامل برگشتگی لبه‌ها به‌دلیل وجود تنش‌های حرارتی از مهم‌ترین آنها است [1]. این پدیده در تحقیق حاضر به‌عنوان تنها دلیل ایجاد تخلخل در نظر گرفته می‌شود. سازوکارهای دیگر عبارتند از محبوس شدن گاز در زیر قطره‌ها، از هم پاشیدگی ذرات هنگام برخورد با سطح و پر شدن ناقص سوراخ‌های موجود در لایه‌ی زیرین [2].



شکل ۲ نمایی از تشکیل لایه‌های پوشش سطحی

تحقیقات آزمایشگاهی زیادی در زمینه‌ی برخورد تک قطره‌ها به سطح انجام شده است. با در نظر گرفتن تأثیر عوامل مختلف مانند سرعت برخورد، دمای سطح و اندازه‌ی قطره بر میزان پخش شدگی آن، رابطه‌هایی برای تعیین بیش‌ترین میزان پخش شدن قطره به‌دست آمده است [3-9]. در این رابطه‌ها، ضریب پخش قطره ($\xi = d_{max}/D$) ارائه شده است که در آن، d_{max} بیش‌ترین قطر پخش شدگی ذره و D قطر اولیه‌ی آن است.

به‌دلیل پیچیدگی سازوکار برگشت لبه‌ی قطره‌ی پخش شده، تحقیقات کمتری در مورد آن انجام شده است. فوکانوما، [10]، مدلی برای شکل‌گیری تخلخل ناشی از برگشت لبه ارائه کرده و نشان داده است که تخلخل بیش‌تر در پیرامون قطره‌ها شکل می‌گیرد، به‌گونه‌ای که محل آن از حدود ۰/۶ شعاع قطره شروع می‌شود. سوبولف و گیلمنی، [11]، یک دسته رابطه‌ی تحلیلی برای تشریح توزیع فشار در زیر قطره‌ی پخش

شـده بـه‌دسـت آورده‌انـد کـه مـی‌تـوان از آن‌هـا بـرای محاسبه‌ی نقطه‌ی آغاز برگشت لبه‌ها استفاده کـرد. زو و همکـارانش، [12]، بـا مطالعـه‌ی چنـدین مقطـع بـرش خورده از قطره‌ی پخش شده در آزمایش‌هـای مختلـف، میزان برگشت لبه‌ی قطره را بر حسـب عوامـل برخـورد قطره و خواص مواد به‌دست آورده‌اند. مبنـای مطالعـات آن‌ها محاسبه‌ی توزیع تنش در قطره‌ی پخش شده بـوده است.

ماار و همکارانش، [13]، نقش عوامل مختلف مـؤثر بـر تخلخـل موجـود در پوشـش تولیـد شـده بـه‌روش زیرکونیای پایدار شده بـا یُتـریم را بـا اسـتفاده از روش آماری طرّاحی آزمایش‌ها بررسی کرده‌اند. بخشی از این نتـایج در مقالـه‌ی حاضـر بـرای تعیـین صـحّت نتـایج مدل‌سازی استفاده شده است.

شناسـایی عوامـل مـؤثر بـر خـواص پوشـش و چگونگی کنترل این عوامل برای به‌دست آوردن پوشش مطلوب، به‌کمک مدل‌سازی تشکیل پوشش با یک روش آماری امکان‌پذیر است. بلاش‌چنکو و چرنیاک، [14]، و سیرولینی و همکاران، [15]، از روش آمـاری دو بعـدی بدون در نظر گرفتن برگشت لبه‌ی قطرات پخش شده به سمت بـالا بـرای بهینـه‌سـازی فراینـد پاشـش حرارتـی استفاده کردند، امّا نتایج آن‌ها بـه‌دلیـل دو بعـدی بـودن مدل و استفاده از نظریه‌ی قدیمی پخـش شـدن قطـره و برگشت لبه از دقّت بالایی برخوردار نبودند. غفوری آذر و همکاران، [16]، روش آمـاری مونـت کـارلو را بـرای مدل‌سازی تشکیل پوشش بر روی سطح به‌کار بردنـد و در توزیع آماری مورد نظر برای قطره‌ها، برخورد مستقیم قطره‌ها به سطح را فرض کرده و زاویه‌ی برخورد قطـره را در نظر نگرفته بودند. افزون بر ایـن، آن‌هـا از توزیـع نرمال برای زاویه‌ی برگشت لبه استفاده کرده بودنـد. زو و همکارانش، [12,17]، در ادامه‌ی کـار غفـوری آذر، از رابطه‌ی مناسب‌تری که در این تحقیق نیز از آن اسـتفاده شده اسـت، بـرای محاسـبه‌ی زاویـه‌ی برگشـت لبـه‌هـا استفاده کرده‌اند. در رابطه‌ی مذکور، خواص ترموفیزیکی ماده و تأثیر اندازه‌ی قطره هنگام برخورد در نظر گرفتـه شده‌اند، امّا در مدل‌سازی از برخورد مایل قطره به سطح صرف نظر کرده و تنها برخورد عمودی قطره بـه سـطح در نظر شده است. بنابراین، قطره‌ها به‌صـورت دایـره‌ای پخش شده و به شکل بیضی در نمی‌آیند.

در این تحقیـق، از یـک مـدل آمـاری سـه بعـدی استفاده شده است که می‌تواند تغییرات میـزان تخلخـل، ضخامت متوسط و زبری سطح را تخمین بزند. در ایـن مدل، برای هریک از متغیرهای فرایند پاشـش از توزیـع مناسب آماری استفاده شده اسـت، و بـرای رفـع نقـص موجـود در کارهـای قبلـی افـزون بـر در نظـر گـرفتن برخورد مایـل قطـره بـه سـطح، روش زو و همکـاران، [12]، برای محاسبه‌ی برگشت لبه به‌کار رفتـه اسـت. در پایان، نتایج به‌دست آمده بـا نتـایج مـاار، [13]، مقایسـه شـده اسـت. بـر اسـاس نتـایج ارائـه شـده مربـوط بـه حالت‌هایی که دمای قطره‌ها در پاشش کـم‌تـر از دمـای ذوب است، میزان تخلخل محاسبه شده بـه‌دلیـل وجـود ذرات ذوب نشده کم‌تر از میزان به‌دسـت آمـده توسـط ماار است، امّا در سایر موارد تطـابق خـوبی بـین نتـایج مدل‌سازی و نتایج ماار، [13]، وجود دارد. پس از تعیین صحّت نتایج مدل‌سازی، تأثیر عوامل مهم فرایند پاشـش بر مشخصات فیزیکی پوشـش در حالـت‌هـای مختلـف بررسی شد. در هر یک از این حالت‌ها، یکـی از عوامـل از قبیل فاصله‌ی مشعل تا سطح، سرعت مشـعل، میـزان مواد پاشیده شده و یا زاویه‌ی برگشت لبه به‌عنوان متغیر فرض شده و سایر عوامل ثابت در نظر گرفته می‌شوند.

روش حل عددی فرایند پاشش حرارتی

مدل پخش شدن قطره. در این تحقیق، همانند مدل زو، [17]، و غفوری آذر، [16]، از هم پاشیدگی قطره هنگـام برخورد با سطح به‌دلیل رسـیدن دمـا بـه نزدیـک دمـای ذوب، در نظر گرفته نشده اسـت. در ایـن مـدل فـرض شده است که هر ذره قبل از برخورد با سـطح بـه‌شـکل کره‌ای به قطر D باشد، و بعد از برخورد به یـک لایـه‌ی

استوانه‌ای به قطر d_{max} تبدیل شود، به‌گونه‌ای که لبه‌های آن به‌دلیل وجود تنش‌های حرارتی به سمت بالا برگشته است (شکل ۳).

از آن‌جا که برخورد بعضی از قطره‌ها به سطح مایل است و پس از برخورد به‌شکل بیضی در می‌آیند، برای محاسبه‌ی بیش‌ترین ضریب پخش، ξ_{max}، از دو رابطه استفاده شده است. برای محاسبه‌ی قطر کوچک‌تر از رابطه‌ای استفاده شده است که توسط پسندیده فرد و همکاران، [18]، با حل عددی برخورد یک قطره به سطح و انجام آزمایش‌های مرتبط به‌دست آمده است (رابطه‌ی ۱– الف). برای محاسبه‌ی قطر بزرگ بیضی نیز از رابطه‌ی دیگری استفاده شده است که توسط اسدی و همکاران، [20]، ارائه و برای مدل‌سازی برخورد مایل قطره به‌کار رفته است (رابطه‌ی ۱– ب). این رابطه‌ها با برقراری حالت توازن بین انرژی کل قطره قبل از برخورد و پس از پخش شدن آن به‌دست آمده‌اند. پس از برخورد با سطح، انرژی جنبشی و انرژی سطحی (ناشی از تنش سطحی) اولیّه‌ی قطره برای غلبه بر اثرات لزجت هنگام پخش شدن آن به‌مصرف می‌رسد. برقراری حالت توازن بین انرژی جنبشی، کشش سطحی و انرژی تلف شده، نرخ پخش شدن قطره را تعیین می‌کند. این رابطه به‌وسیله‌ی محقّقان زیادی استفاده شده است. در این زمینه می‌توان به کارهای غفوری آذر و همکاران، [16]، مستقیمی و همکاران، [21]، و عابدینی و همکاران، [22]، اشاره کرد. این رابطه‌ها به‌شکل زیر هستند:

(۱–الف) برخورد عمودی قطره

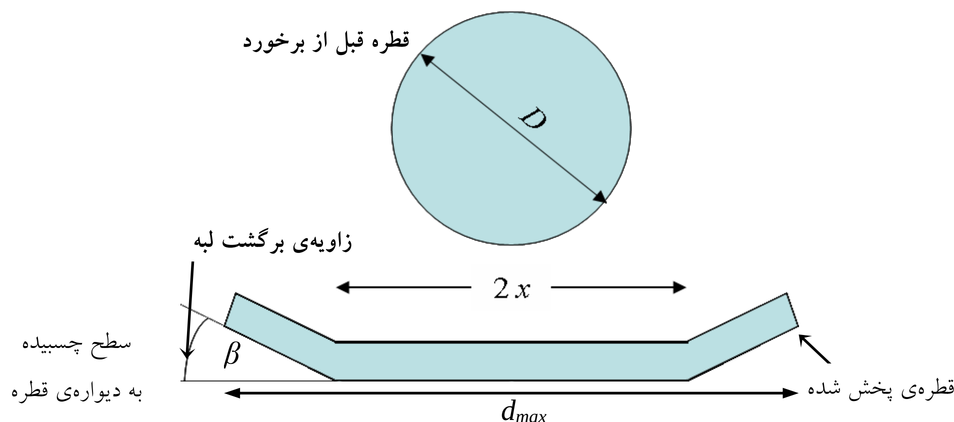
$$\xi_{max} = \frac{d_{max}}{D} = \sqrt{\frac{We+12}{3(1-\cos\theta)+4(We/\sqrt{Re})+We\sqrt{\frac{3}{4}\frac{Ste}{Pe}}}}$$

(۱– ب) برخورد مایل قطره

$$\xi_{max} = \frac{d_{max}}{D} = \sqrt{\frac{We+12}{3(1-\cos\theta)+8(We/\sqrt{Re})Sin\eta}}$$

در این رابطه‌ها، اعداد بدون بعد رینولدز (Re)، وبر (We)، پرانتل (Pr)، استفان (Ste) و پکلت (Pe) به وسیله‌ی رابطه‌های زیر تعریف می‌شوند:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu}, \quad We = \frac{\rho V^2 D}{\gamma}, \quad Pr = \frac{C_l \mu}{k}, \quad Ste = \frac{C_l(T_m - T_{w,i})}{H_f}, \quad Pe = Re.Pr \qquad (۲)$$



شکل۳ تصویر ذره قبل و بعد از برخورد، و نمایش برگشت لبه‌ی قطره (x : محل شروع برگشت لبه، و β : زاویه‌ی برگشت لبه)

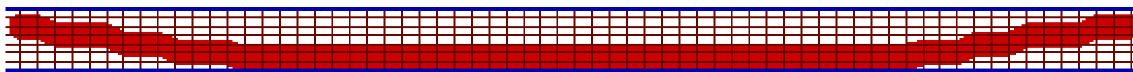
افزون بر این، η زاویه‌ی برخورد قطره با سطح، θ زاویه‌ی تماس بین مایع و سطح تحت پوشش، شکل(۳)، $T_{w,i}$ دمای اولیّه‌ی سطح، k ضریب هدایت حرارتی، γ ضریب کشش سطحی، μ لزجت، C_l گرمای ویژه‌ی مذاب، T_m دمای ذوب و H_f گرمای نهان ذوب ذره هستند.

مدل شکل‌گیری لایه

در این تحقیق، چگونگی قرارگیری لایه‌های ناشی از پخش ذرات بر روی هم به‌کمک کامپیوتر و بر مبنای نسبت حجمی سیال (VOF) مدل‌سازی شده است [16,17]. در این روش، از تابع اسکالر f برای هر سلول محاسباتی استفاده شده است، به‌گونه‌ای که اگر سلول پر از سیال باشد، مقدار f برابر با یک خواهد بود. مقدار f برای سلول‌های خالی برابر با صفر و بر روی مرز قطره در بازه‌ی $0 < f < 1$ قرار دارد (شکل۴).

مدل تحلیلی برگشت لبه‌ی اسپلت

لبه‌ی قطره‌های پخش شده در نتیجه‌ی وجود تنش‌های پس‌ماند حرارتی به‌سمت بالا بر می‌گردد. به‌دلیل وجود اختلاف دما بین دیواره و قطره، قطره بعد از پخش شدن سرد شده و شروع به انجماد می‌کند. با توجه به تفاوت نرخ انجماد در لایه‌ی نزدیک به دیواره و لایه‌ی نزدیک به سطح آزاد و با در نظر گرفتن وجود ضریب انقباض حرارتی ماده در نتیجه‌ی انجماد، تنش‌های پس‌ماند در اسپلت ظاهر می‌شوند. این پدیده یکی از مهم‌ترین دلایل به‌وجود آمدن تخلخل در پوشش است. دو عامل اساسی، یعنی محل شروع و زاویه‌ی برگشت آن، در برگشت لبه‌ی اسپلت دخالت دارند (شکل ۳). محل شروع بالا رفتگی و میزان آن، به جنس ذره و شرایط برخورد، و نیز به عواملی مانند اختلاف ضریب انبساط حرارتی فاز مایع و جامد، کشش سطحی فاز مایع، زبری سطح و ذوب شدن مجدد ذره بستگی دارند [3]. مشاهدات فوکانوما، [10]، نشان می‌دهد که اکثر حفره‌ها در کناره‌ی اسپلت و در فاصله‌ی حدود ۶۰ درصدی از شعاع شکل می‌گیرند. غفوری آذر و همکاران، [16]، از همین مقدار در تحلیل خود استفاده کرده‌اند، ولی آن‌ها برای محاسبه‌ی زاویه‌ی برگشت لبه‌ی قطره از رابطه‌ی خاصی استفاده نکرده و به جای آن، از توزیع آماری ویژه‌ای استفاده کرده‌اند.



(الف)

(ب)

شکل ۴ الف) برگشت لبه‌ی قطره در محاسبات به‌روش نسبت حجمی سیال (VOF)، ب) روش نسبت حجمی سیال برای پیدا کردن سطح آزاد قطره

اشکال این روش حل، فرض نادرست عدم وابستگی زاویه‌ی برگشت به ضخامت اسپلت است که در انجماد آن تأثیر زیادی دارد. افزون بر این، غفوری آذر نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نکرده و تنها بر استفاده از روش‌های آماری تأکید داشته است، با این حال کار او سرآغاز خوبی برای مدل‌سازی بوده است. زو و همکاران، [12]، برای بهبود کار غفوری آذر رابطه‌ی ساده‌ی زیر را برای تعیین زاویه‌ی برگشت لبه به‌دست آورده‌اند که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است:

$$\beta = \arctan\left(\frac{xR\alpha\Delta T}{h_s}\right) \qquad (۳)$$

در این رابطه، h_s ضخامت اسپلت، α ضریب انبساط حرارتی، $R=D/2$ شعاع اسپلت، ΔT اختلاف دما بین قطره و سطح و x نقطه‌ی شروع برگشت است (شکل(۳))، که همگی بر اساس داده‌های تجربی به‌دست آمده‌اند. در تحقیق زو و همکاران، [12]، صحّه گذاری مدل با مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج تجربی حاصل از بررسی مستقیم تخلخل، انجام شده است.

مدل آماری

سه فرض اساسی در یک مدل آماری عبارتند از: عدم تداخل ذرات مذاب با یکدیگر، تصادفی بودن پاشش ذرات (هر ذره دارای اندازه، سرعت V و محل برخورد مشخص است)، و احتمال وجود یک ذره در هر لحظه مستقل از سایر ذرات. با این‌که پاشش فرایندی وابسته به زمان است و طبیعتاً باید از تعریف زنجیره‌ی مارکُف برای تعیین متغیرهای تصادفی مربوط به پارامترهای فرایند استفاده کرد، امّا فرایند برای ساده‌سازی یکنواخت فرض شده است. با توجه به شرایط فوق، در این مدل فرض شده است که سرعت، دمای قطره و زاویه‌ی پاشش از تابع توزیع احتمال نرمال (رابطه‌ی۴) و اندازه‌ی قطره‌ها از تابع توزیع احتمال لگاریتمی نرمال (رابطه‌ی ۵) پیروی کنند [۱۷ و ۱۶].

(۴) تابع توزیع نرمال

$$g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right]$$

(۵) تابع توزیع لگاریتمی نرمال

$$g_l(x) = \frac{1}{x\sigma_l\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(\ln x-\bar{x}_l)^2}{2\sigma_l^2}\right]$$

در این رابطه‌ها، g و g_l متغیرهای احتمالی، $\bar{x}$ میانگین، σ انحراف معیار، σ_l لگاریتم انحراف معیار و μ_l میانگین لگاریتمی هستند. توزیع نرمال به‌شکل یک ناقوس می‌باشد که حول میزان میانگین آن ($\bar{x}$) متقارن است. میزان پهنی این ناقوس با انحراف معیار نشان داده می‌شود. بسیاری از پدیده های طبیعی به‌طور تقریبی از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. توزیع لگاریتمی نرمال در آمار و احتمال توزیعی است که لگاریتم طبیعی آن دارای توزیع نرمال با پارامترهای $\bar{x}$ وσ می‌باشد. به‌عبارت دیگر، اگر X متغیری با توزیع نرمال باشد، $Y = \exp(X)$ دارای توزیع لگاریتمی نرمال خواهد بود.

پودر مورد استفاده در مدل‌سازی از جنس زیرکونیای پایدار شده با یوتریم بود. این پودر با علامت تجاری Sulzer Metco 204NS و مشخصات $d_{10} = 16\mu m$، $d_{50} = 50\mu m$ و $d_{90} = 95\mu m$، دارای ذراتی به‌شکل کروی بود. با توجه به این‌که مشخصه‌ی $d_{90} = 95\mu m$ به معنی آن است که ۹۰ درصد ذرات پودر قطری کم‌تر از ۹۵ µm دارند، و هم‌چنین سایر مشخصّات پودر، توزیع آماری مورد نظر را می‌توان تعیین کرد. افزون بر این، ذرات پودر با عنوان $ZrO_28Y_2O_3$ -125+11µm مشخص می‌شوند، و معنی آن این است که درون پودر ذراتی به قطر کوچک‌تر از ۱۱ µm و بزرگ‌تر از ۱۲۵ µm وجود ندارند. بنابراین در مدل‌سازی این تحقیق پس از به‌دست آوردن قطر ذرات، ذراتی را که قطر آن‌ها بین ۱۱ و ۱۲۵ میکرون هستند با استفاده از تابع آماری لگاریتمی نرمال (مشابه شکل ۵) انتخاب می‌کنیم.

روش حل

پس از شبکه‌بندی میدان حل، ابتدا بـا اسـتفاده از روش آماری عوامل مورد نیاز مشخص می‌شـوند. بـرای پیـدا کـردن قطـر اسـپلت از رابطـه‌ی ۲ اسـتفاده کـرده و بـا به‌کـارگیری روش VOF، مـرز اسـپلت در میـدان حـل تعیین می‌شود. پس از پخش شدن قطـره بـا توجـه بـه رابطـه‌ی ۳ و فـرض کـردن مقـدار ثابـت ۰٫۶ بـرای α زاویـه‌ی برگشـت محاسـبه شـده و از آن در جابجـایی مرزهای اسپلت استفاده می‌شـود. ایـن عمـل منجـر بـه خالی شدن فضای زیر لبه‌های آن می‌شود. این کار برای قطره‌ی بعدی هم انجام مـی‌شـود، بـا ایـن تفـاوت کـه هنگام اسـتفاده از روش VOF بـرای پیـدا کـردن مـرز قطره، وجود قطره‌های قبلی درون میـدان حـل در نظـر گرفته مـی‌شـود و پـس از پیـدا شـدن موقعّیـت سـطح زیرین، چگونگی پخش شـدن قطـره‌ی جدیـد بررسـی می‌شود.

برای تولید اعداد تصادفی، از الگوریتم ارائه شـده توسط آلن میلر استفاده شده اسـت. در نهایـت پـس از پایـان مرحلـه‌ی پاشـش قطـره‌هـا و بـرای محاسـبه‌ی ضخامت و میزان تخلخل، الگوریتم‌های متفاوتی به‌کـار برده شدند. رابطه‌ی زیـر بـرای تعیـین میـزان تخلخـل استفاده شد:

$$\text{porosity} = \frac{V_g}{V_g + V_m} \times 100 \qquad (۶)$$

که در آن، V_g فضای خالی محاسبه شده بین قطره‌هـای پخـش شـده و V_m حجـم اشـغال شـده توسـط مـاده می‌باشد.

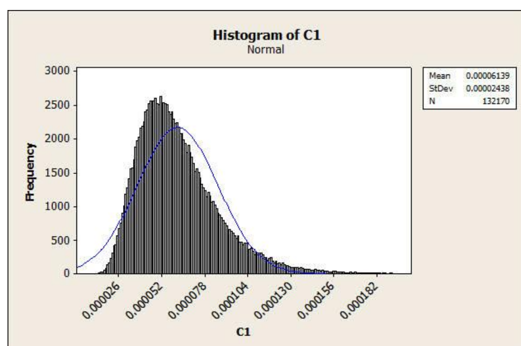
نتایج و بحث

شـکل (۶) آن‌چـه کـه هنگـام پوشـش دهـی اتفـاق می‌افتد را در چند مرحله نشان می‌دهد. در ایـن شـکل، پراکندگی آماری برخـورد قطـره‌هـا بـا سـطح مشـاهده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شـود، برخـورد ۵۰۰ قطـره‌ی آلومینـا بـا سـرعت متوسـط 100 m/s و قطـر متوسط ۵۰ میکرون در مراحل مختلف، پس از برخورد ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ قطره با سطح نشـان داده شـده است.

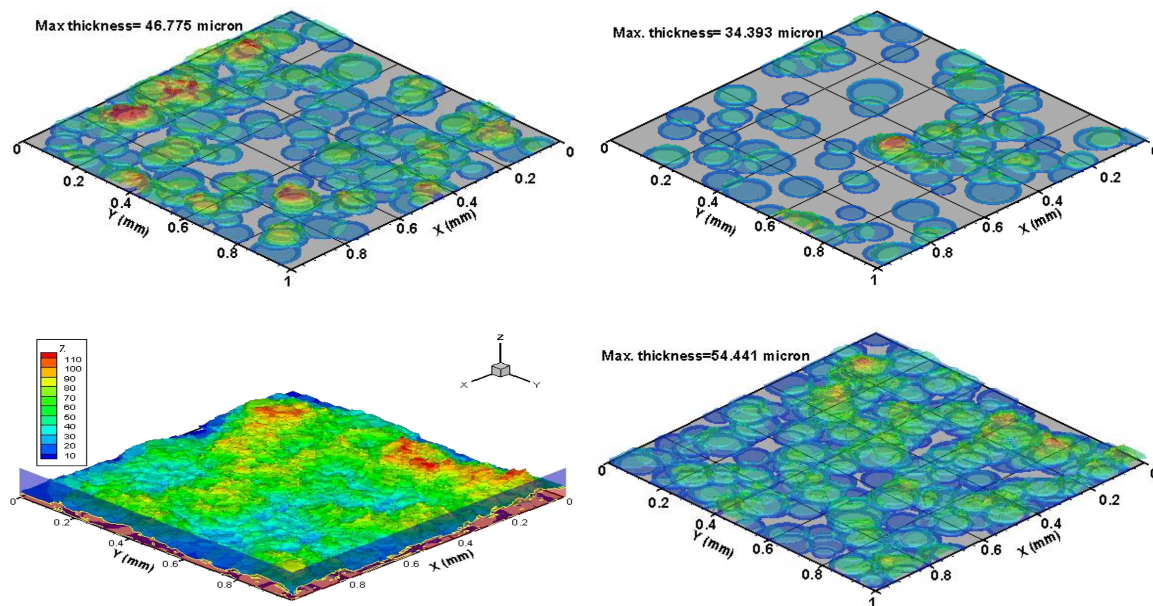
صـحّه گـذاری نتـایج. بـرای صـحّه گـذاری نتـایج مدل‌سازی، از داده‌ها و نتـایج مـاِلِر و همکـاران، [۱۳]، استفاده شد. در این شرایط، مشخصّات فراینـد اسـپری پلاسما (APS) برای زیرکونیای پایدار شـده بـا یـوتریم (YSZ) در نظـر گرفتـه شـد. ایـن مـواد از جـنس Sulzer Metco 204NS (با مشخصّات d10 = 16 μm، d50 = 57 μm و d90 = 95 μm) دارای توزیع لگاریتمی نرمال با میانگین ۵۷ µm و انحراف معیار ۱/۴۷ بوده‌اند. شرایط انجام آزمایش به‌همراه نتایج آن در جـداول (۱) و(۲) آمده‌اند.

همـان‌طـور کـه در نتـایج جـدول (۲) مشـاهده می‌شـود، مـدل‌سـازی انجـام شـده در ایـن تحقیـق از توان‌مندی خوبی برخوردار بوده است. در این مدل، اگر چه میزان تخلل محاسبه شده کم‌تـر از مقـادیر محاسـبه شده توسط ماِلِر مـی‌باشـد، امّـا رونـد تغییـرات تقریبـاً یکسان است.

افزون بر این، برای اطمینـان از تـوان‌منـدی مـدل به‌کار رفته، نتایج زو و همکـاران نیـز بررسـی شـدند و نتایج این بررسی در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل۵ توزیع لگاریتمی نرمال مربوط به اندازه‌ی ذرات



شکل ۶ طرح‌واره‌ای از پوشش دهی در سطحی به ابعاد 1mm×1mm
(قطر متوسط ذرات 50 µm و سرعت برخورد متوسط ذرات با سطح 100 m/s بوده‌اند)

جدول ۱ مشخصات فرایند پوشش سطح

سرعت پاشش پودر	۲۵g/min
فاصله مشعل از سطح	متغیر از ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلیمتر
سرعت حرکت مشعل	۵۰۰mm/s
تعداد سیکل حرکت مشعل	۵ رفت و برگشت

جدول ۲ مقایسه‌ی با نتایج ماِار و همکاران [13]

ردیف	فاصله‌ی مشعل از سطح (mm)	دمای ذرات (°C)	سرعت ذرات (m/s)	تخلخل (از نتایج ماِار و همکاران)	تخلخل (محاسبه شده)	ضخامت (µm) (از نتایج ماِار و همکاران)	ضخامت (µm) (محاسبه شده)
۱	۲۰۰	۲۷۶۰	۱۸۹	۹/۴۳	۹/۲	۴۰۸	۴۰۰
۲	۲۰۰	۲۸۲۴	۱۹۷	۸/۳	۸/۱	۴۰۷	۳۸۷
۳	۲۵۰	۲۷۰۲	۱۸۳	۹/۴۳	۹/۳	۴۱۸	۴۰۳

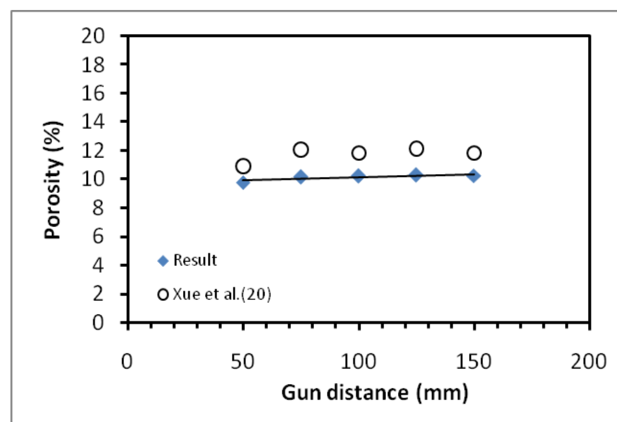
جدول ۳ مقایسه‌ی نتایج با نتایج زو و همکاران [17]

ردیف	دمای ذرات (°C)	سرعت ذرات (m/s)	قطر ذرات (µm)	تخلخل (از نتایج محاسبات زو و همکاران)	تخلخل (از نتایج تجربی زو و همکاران)	تخلخل (محاسبه شده با رابطه‌ی ۶)
۱	۲۷۱۶	۱۶۸	۶۱	۹/۶	۱۰/۷	۱۰/۵
۲	۲۷۸۴	۱۸۱	۵۰	۸/۸	۷	۶/۳
۳	۲۸۲۱	۲۰۶	۳۹	۶/۸	۵/۶	۵/۱

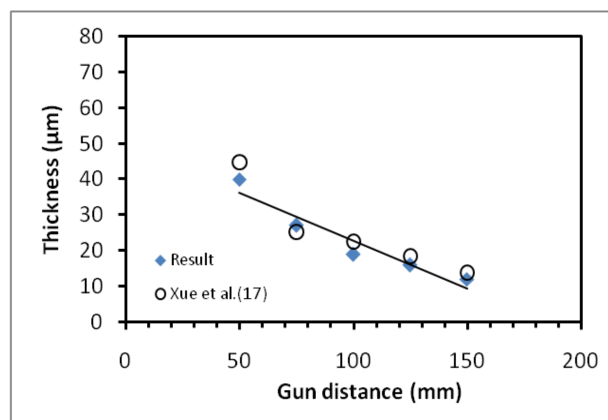
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این مقایسه نیز میزان تخلخل محاسبه شده از رابطه‌ی ۶ کم‌تر از میزان آن در نتایج زو است، امّا دارای روند یکسانی بوده و در مقایسه با نتایج محاسبات زو به واقعیت نزدیک است.

بررسی عوامل مهم فرایند پاشش. پس از کسب اطمینان از صحّت مدل‌سازی صورت گرفته، به بررسی تأثیر عوامل مختلف فرایند بر میزان تخلخل، ضخامت و زبری سطح پوشش داده شده پرداخته‌ایم و نتایج حاصل با نتایج به‌دست آمده توسط زو مقایسه شده‌اند. فاصله‌ی مشعل از سطح عاملی است که فرایند مورد نظر را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد (شکل‌های (۷) و (۸)). در مدل‌سازی‌ها، سرعت مشعل برابر با ۴۰۰ mm/s و دبی جرمی پودر برابر با ۰/۱۳ gr/s فرض شده‌اند. شکل (۷) نشان می‌دهد که فاصله‌ی مشعل از سطح تاثیر زیادی بر میزان تخلخل نداشته و در آن تخلخل تقریباً ثابت مانده است. در این حالت نیز تخلخل محاسبه شده کم‌تر از میزان آن در نتایج زو بوده است.

در شکل (۸) دیده می‌شود که با افزایش فاصله‌ی مشعل، ضخامت کاهش می‌یابد. دلیل کاهش ضخامت، برخورد کم‌تر ذرات به محدوده‌ی مورد نظر از سطح می‌باشد. در این حالت، مطابقت روند تغییرات با نتایج زو چشم‌گیر است.



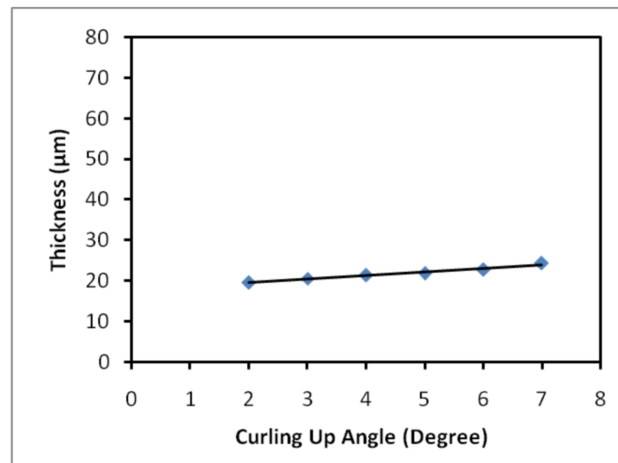
شکل ۷ تغییرات ضخامت بر حسب فاصله‌ی مشعل از سطح
(سرعت مشعل برابر با 400 mm/s، دبی جرمی پودر برابر با 0.13 gr/s و قطر متوسط ذرات برابر با 25 µm)



شکل ۸ تغییرات تخلخل بر حسب فاصله‌ی مشعل از سطح
(سرعت مشعل برابر با 400 mm/s، دبی جرمی پودر برابر با 0.13 gr/s و قطر متوسط ذرات برابر با 25 µm)

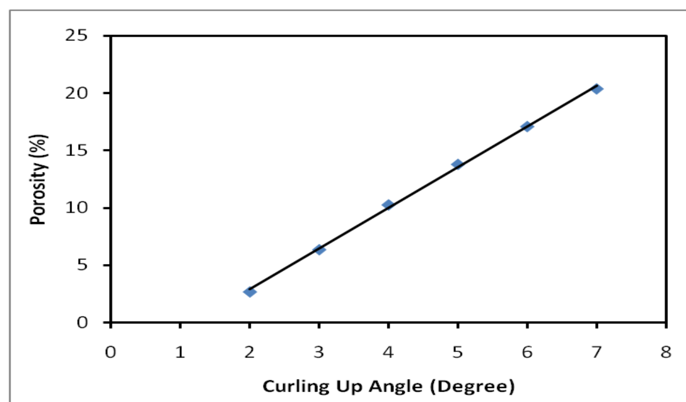
برای نمایش تاثیر محاسبه‌ی زاویه‌ی برگشت لبه بر محاسبات در شکل‌های (۹) و (۱۰)، زاویه‌ی برگشت لبه استثنائاً از رابطه‌ی (۳) محاسبه نشده است. اگر چه این حالت واقعی نیست، امّا برای نشان دادن تأثیر زاویه و نحوه‌ی محاسبه‌ی آن ضروری است. به این ترتیب، برای زاویه‌های مختلف با انحراف معیار ثابت ۰/۵ و فاصله‌ی ثابت مشعل از سطح برابر با mm ۱۵۰، میزان‌های تخلخل و ضخامت محاسبه شده‌اند.

در شکل (۹) نشان داده شده است که زاویه‌ی برگشت تأثیر زیادی بر ضخامت محاسبه شده ندارد، امّا از شکل (۱۰) می‌توان دریافت که زاویه‌ی برگشت لبه تأثیر بسیار زیادی بر تخلخل محاسبه شده دارد. با افزایش زاویه‌ی برگشت لبه، میزان تخلخل به‌دلیل ایجاد فضای خالی زیاد در زیر اسپلت، افزایش زیادی می‌یابد. بنابراین، انتخاب رابطه‌ی مناسبی برای محاسبه‌ی این زاویه از اهمیّت ویژه‌ای برخوردار است.

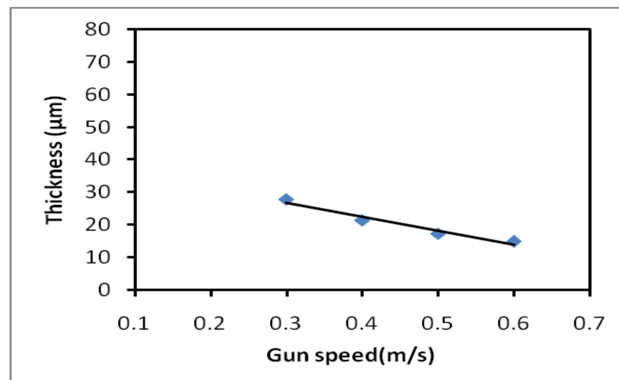


شکل ۹ تغییرات ضخامت بر حسب زاویه‌ی برگشت لبه

(سرعت مشعل برابر با 400 mm/s، دبی جرمی پودر برابر با 0.13 gr/s، قطر متوسط ذرات برابر با 25 µm و فاصله‌ی مشعل از سطح برابر با 150 mm)

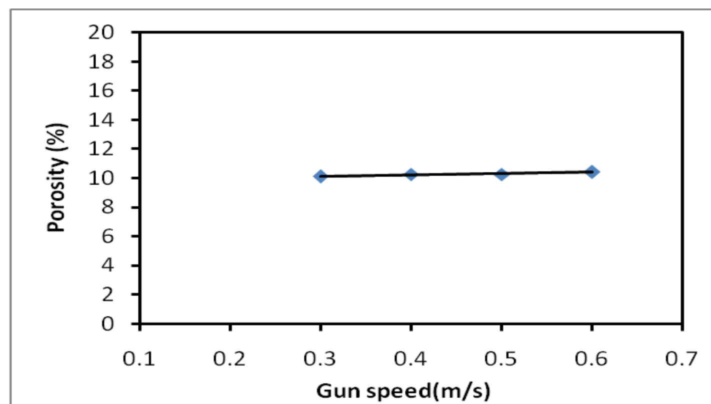


شکل ۱۰ تغییرات تخلخل بر حسب زاویه‌ی برگشت لبه (سرعت مشعل برابر با 400 mm/s، دبی جرمی پودر برابر با 0.13 gr/s، قطر متوسط ذرات برابر با 25 µm و فاصله‌ی مشعل از سطح برابر با 150 mm)



شکل ۱۱ تغییرات ضخامت بر حسب سرعت حرکت مشعل

(فاصله‌ی مشعل از سطح برابر با 150 mm، دبی جرمی پودر برابر با 0.13 gr/s، قطر متوسط ذرات برابر با 25 µm و زاویه‌ی متوسط برگشت لبه برابر با 4°)



شکل ۱۲ تغییرات تخلخل بر حسب سرعت حرکت مشعل

(فاصله‌ی مشعل از سطح برابر با 150 mm، دبی جرمی پودر برابر با 0.13 gr/s، قطر متوسط ذرات برابر با 25 µm و زاویه‌ی متوسط برگشت لبه برابر با 4°)

برای بررسی تأثیر سرعت حرکت مشعل، آنرا بین ۰/۳ تا ۰/۶ متر بر ثانیه تغییر داده و برای جلوگیری از تأثیر تغییرات زاویه‌ی برگشت لبه در این مرحله، آن‌را ثابت و برابر با ۴ درجه فرض کردیم. نتایج به‌دست آمده با حفظ فاصله‌ی ۱۵۰ میلی‌متر مشعل از سطح، در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ارائه شده‌اند.

همان‌گونه که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، با افزایش سرعت مشعل ضخامت کاهش می‌یابد. دلیل منطقی آن را می‌توان برخورد تعداد کم‌تری قطره در زمان ثابت پاشش دانست که منجر به کم‌تر شدن میزان ماده‌ای می‌شود که بر روی سطح می‌نشیند. از طرف دیگر، در شکل (۱۲) دیده می‌شود که سرعت حرکت مشعل تأثیری بر میزان تخلخل محاسبه شده ندارد. دلیل عدم تأثیر میزان تخلخل، سرعت نسبی بسیار کم حرکت مشعل نسبت به سرعت برخورد قطره‌ها با سطح است که باعث ثابت ماندن زاویه‌ی برخورد قطره با سطح می‌شود. به‌این ترتیب، روند مطابق انتظار است.

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، تأثیر مقدار دبی

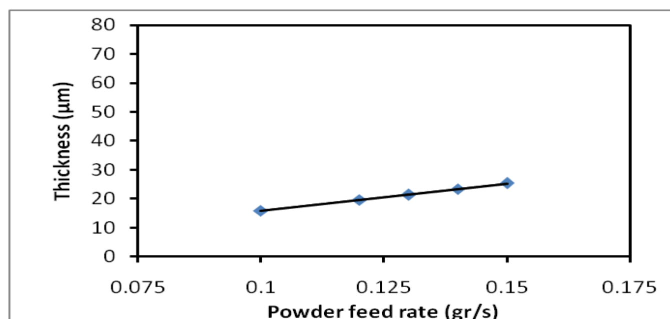
جرمی پودر پاشیده شده به سطح بر عوامل فیزیکی پوشش نشان داده شده است. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که با افزایش دبی جرمی پودر، ضخامت افزایش می‌یابد. دلیل آن را می‌توان، همانند شکل (۱۱)، مقدار جرم موادی دانست که بر روی سطح می‌نشیند. واضح است که با افزایش دبی جرمی، میزان مواد پاشیده شده بر روی سطح بیش‌تر می‌شود و در نتیجه، ضخامت افزایش می‌یابد.

شکل (۱۴) نشان می‌دهد که با تغییر دبی، میزان تخلخل ثابت می‌ماند. از آن‌جا که دبی تأثیری بر برگشت لبه ندارد، بر روی فضای خالی زیر لبه‌های اسپلت و در نتیجه، بر میزان تخلخل نیز تأثیری ندارد.

نتیجه‌گیری

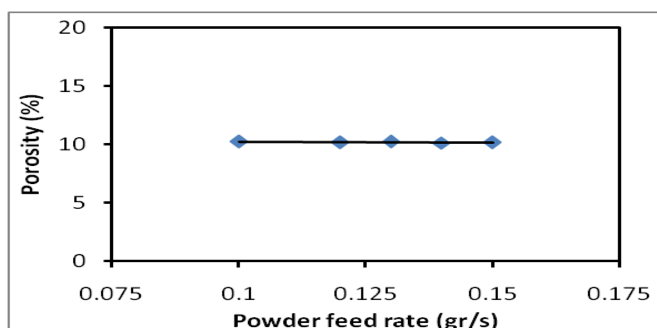
در این پژوهش، فرایند پاشش حرارتی به‌روش آماری مدل‌سازی شد و در آن، تأثیر عوامل مختلف فرایند بر روی تخلخل به‌دست آمده و ضخامت پوشش بررسی شد و نتایج زیر به‌دست آمدند:

۱- مقایسه‌ی نتایج حاصل از این تحقیق که با داده‌های تجربی موجود و نتایج عددی تحقیق دیگر در جدول (۲) صحّه گذاری شده است نشان می‌دهد که کد تدوین شده ابزار مناسبی برای مدل‌سازی پوشش‌دهی سطح می‌باشد.



شکل ۱۳ تغییرات ضخامت بر حسب دبی جرمی پودر

(فاصله‌ی مشعل از سطح برابر با 150 mm، سرعت مشعل برابر با 400 mm/s، قطر متوسط ذرات برابر با 25 µm، زاویه‌ی متوسط برگشت لبه برابر با 4°)



شکل ۱۴ تغییرات ضخامت بر حسب دبی جرمی پودر

(فاصله مشعل از سطح=150mm، سرعت مشعل= 400 mm/s، قطر متوسط ذرات= 25µm، زاویه متوسط برگشتگی لبه=4°)

۲- نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهند که نحوه‌ی محاسبه‌ی زاویه‌ی برگشت لبه تأثیر زیادی بر نتایج دارد (شکل (۱۰)).

۳- نتایج نشان می‌دهند که عواملی از قبیل فاصله‌ی مشعل از سطح، سرعت مشعل و دبی جرمی پودر تاثیری بر میزان تخلخل ندارند.

۴- افزون بر این، نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت مشعل و فاصله‌ی مشعل از سطح، ضخامت پوشش کاهش می‌یابد.

مراجع

1. L. Pawlowski. "The science and engineering of thermal spray coatings", 1st edition John Wiley & Sons, (1995).
2. M. Xue, S. Chandra, J. Mostaghimi, R. Salimijazi, " Formation of pores in thermal spray coatings due to incomplete filling of crevices in patterned surfaces", Plasma Chemistry Plasma Process, 27:647-657, (2007).
3. Moreau, C., Cielo, P. and Lamonta, M. "Flattening and solidification of thermal sprayed particles", Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition, 761–766, ASM International, Orlando, FL, USA, (1992).
4. Bhola, R. and Chandra, S. "Parameters controlling solidification of molten wax droplets falling on a solid surface", *Journal of Materials Science 34(19)*, 4883–4894, (1999).
5. M. Fukamoto and Y. Huang "Flattening mechanism in thermal sprayed nickel particle impinging on flat substrate surface", *Journal of Thermal Spray Coating*, 8(3):427-432, (1999).
6. S. D. Aziz and S. Chandra, "Impact, recoil and splashing of molten droplets", *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 43:2841-2857,(2000).
7. Attinger, D., Zhao, Z. and Poulikakos, D. "An experimental study of molten microdroplet surface deposition and solidification: transient behavior and wetting angle dynamics", *Journal of Heat Transfer 122(3)*, 544–556, (2000).
8. G. Trapaga, E. F. Matthys, J. J. Valencia and J. Szekely, "Fluid Flow, Heat transfer and solidification of molten droplets impinging on substrates: comparison and experimental results", *Metallurgical Transactions B*, 23B:701-718, (1992).
9. R. Ghafouri-azar, J. Mostaghimi and S. Chandra, "Numerical Study of Impact and Solidification of a Droplet Over a Deposited Frozen Splat", *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 18 (2), pp. 133–138, (2004).
10. H. Fukanuma, "A porosity formation and flattening model of an impinging molten droplet in thermal spray coatings", *J. of Thermal Spray Technology*., Vol.3 (1), (1994).
11. V. V. Sobolev and J. M. Guilemany, "Flattening of droplets and formation of splats in thermal

spraying: a review of recent work –part1", *Journal of Thermal Spray Technology*, 8 :(1): 87-101, (1999).

12. M. Xue, S. Chandra and J. Mostaghimi, "Investigation of splat curling up in thermal spray coatings", *J. of Thermal spray Technology*, Vol.15 (4), 2006.
13. G.Mauer, R.Vasen, D.Stover , "Atmospheric plasma spraying of yttria-stabilized zirconia coatings with specific porosity" , Surface & Coatings Technology 204, 172–179, (2009).
14. V.E. Belashchenko and Yu. B. Chernyak, "Stochastic approach to the modeling and optimization of thermal spray coating formation", *J. of Thermal Spray Technology*. Vol.2 (2), (1993).
15. S. Cirolini, H. Harding, and G. Jacucci, "Computer Simulation of plasma-sprayed coatings deposition model", *Surf. Coat. Technology*, Vol. 48, (1991).
16. R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi, S.Chandra and M. Charmchi, "A stochastic model to simulate the formation of a thermal spray coating", *J. of Thermal Spray Technology*, Vol.12, 2003.
17. M. Xue, S. Chandra, J. Mostaghimi and C. Moreau, "A stochastic coating model to predict the microstructure of plasma sprayed zirconia coatings", *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol.16(6), (2008).
18. M. Pasandideh-Fard, R. Bhola, S. Chandra and J. Mostaghimi, "Deposition of tin droplets on a steel plate: simulation and experiments", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. Vol.41, (1998).
19. M. Pasandideh-Fard, Y. M. Qiao, S. Chandra, and J. Mostaghimi, "Capillary effects during droplet impact on a solid surface", *Phys. Fluids 8 (3)*, pp650-659,(1996).

۲۰. س. اسدی، م. پسندیده‌فرد و م. مقیمان، " شبیه‌سازی عددی و مدل تحلیلی برخورد مایل قطره با سطح زیر لایه در فرایند لایه نشانی به‌روش پاشش حرارتی"، مجله‌ی علوم و مهندسی سطح، ج (۴)، ص ۱-۱۴، (۱۳۸۶).

21. J. Mostaghimi, S. Chandra. "Splat formation in plasma-spray coating process", *Pure Applied Chemistry*, Vol.74 No.3, (2002).
22. A.Abedini, A. Pourmousa, S. Chandra and J. Mostaghimi, "Effect of substrate temperature on the properties of coatings and splats deposited by wire arc spraying", *J. Surface and Technology*, (2006).